

機関番号：32675

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19201002

研究課題名（和文） 陸上生態系の炭素シンク能力における長期持続性の検証

研究課題名（英文） Long-term durability of carbon sequestration in terrestrial ecosystems

研究代表者

鞠子 茂 (MARIKO SHIGERU)

法政大学・社会学部・教授

研究者番号：10251018

研究成果の概要（和文）：

菅平調査により、二次遷移に伴いバイオマスや土壌有機炭素は増加傾向を示し、草原期から木本期への移行時に土壌有機炭素量の減少が明らかとなった。その原因は、草本期では土壌へ供給されていた枯死有機物の多くが樹木体内に残るようになったためであると考えられた。遷移／炭素動態モデルによるシミュレーションは実測値と同様の結果を示す。一次遷移に伴う土壌有機炭素の増加は極相に至るまで継続することが三宅島調査で明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

This study consists of the following three sub-themes: 1) quantitative evaluation of temporal variability of carbon cycle parameters along with secondary succession; 2) examination of sustainable carbon sequestration within developing ecosystems in terms of a succession/carbon dynamics model; 3) temporal variation of soil organic carbon with primary succession. Our chronosequence study of secondary succession in Sugadaira, Nagano prefecture, used for the following ecosystem sequence: *Artemisia*-dominant grassland, *Miscanthus*-dominant grassland, *Populus*-dominant forest, *Pinus*-dominant forest, *Quercus*-dominant forest and *Fagus*-dominant forest. Carbon sequestration within the plants increased with succession. However, litter carbon showed no increase or decrease with succession. Soil carbon increased in herbaceous sere, and decreased in early forest stages. Thus, our results demonstrated that secondary succession influenced the size of carbon pools within the ecosystems. The measured results were confirmed by a simulation in terms of a succession/carbon dynamics model. In primary succession study (Miyakejima study site), soil organic carbon increased from a naked land to a climax stage.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	10,200,000	3,060,000	13,260,000
2008年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2009年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2010年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
年度			
総計	29,300,000	8,790,000	38,090,000

研究分野：生態系生態学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：植生遷移モデル，生態系炭素循環，炭素貯留機能，土壌有機炭素，一次遷移，二次遷移

1. 研究開始当初の背景

京都議定書では、CO₂削減量を算定する際に森林（植林地）のCO₂吸収量を差し引くことが取り決められていることから、森林生態系の炭素吸収量がどの程度であるのかという点に注目が集められてきた。これを受けて多くの炭素循環プロジェクト研究が行われてきた。本課題の申請者の多くもこれらのプロジェクトに参加し、生態系炭素循環プロセスの地上観測を精力的に行ってきた。炭素循環プロジェクト研究が報告した成果の中で“驚くべきこと”の一つは、微気象学的手法と生態学的手法で観測されたすべての気候帯の森林・草原生態系は炭素のシンクであるというものであった。このことがなぜ“驚くべきこと”なのか。それは、発展途上の生態系は炭素を吸収するが、成熟した生態系は炭素の吸収も放出も起こらないニュートラルなシステムであるとする生態学における考え方が長い間支持されてきたからである（Schlesinger 1995; Amber & Mellilo 2002）。しかし、これまでの研究から異なる手法でクロスチェックされた結果に間違いがあるとは思えないことから、少なくとも観測した生態系では炭素吸収があったと見るのが適切だと考えている

申請者らがこれまでに行ってきた一次・二次遷移に伴う炭素循環の変化に関する研究成果や他の研究者の報告から、生態系が炭素のシンクであり続ける理由は、土壌という無尽蔵の炭素リザーバーが重要ななはたらきをするためであるという仮説を提唱したい。本申請課題はこの仮説を検証することを目的としている。

2. 研究の目的

本研究課題は「陸上生態系の炭素シンク能力における長期持続性の検証」である。本課題が明らかにすることは、次の3点である。

(1) 陸上生態系の時間変化に伴う炭素循環の変化について基礎的な知見を得ること

(2) 炭素循環プロセスの時間変化を記述できるモデルを構築すること

(3) 生態系が炭素シンク機能を維持し続けるメカニズムを解明すること

生態系の時間変化には、二通りの時間スケールを想定することができる。一つは優占する植生の時間変化、つまり植生遷移に伴う生態系の変化であり、もう一つは1つの生態系の始まりから終わりまでである（e.g. 植林地における植林開始から伐採まで）。前者は後者を網羅することから、本課題では、前者の植生遷移にのみ注目する。そのため、上記の目的における“時間

変化”は“遷移”と読み替えることができる。研究期間内に上記3つの目的を明らかにするが、その流れは次の模式図で表される。



遷移に伴う炭素循環の変化に関する基礎調査は、筑波大学菅平高原実験センター内および周辺の生態系を対象として行う。菅平高原実験センターは、すでに二次遷移の研究が30年以上も行われてきた実績があること、さらには遷移系列（裸地→草原→森林）の年代が特定できる生態系が複数保存されていることから、本課題を遂行する上で他に類を見ないほど理想的なフィールドである。このフィールドでの野外調査を通じて各遷移段階の生態系における炭素循環のコンパートメントモデルを作成する（基礎的知見）。さらには、得られたパラメータから炭素循環の遷移モデルの構築を行い、基礎的知見と合わせて生態系炭素シンク機能の長期持続メカニズムの解明を行う。

遷移研究（基礎的知見+モデル）から生態系炭素シンク機能の長期持続メカニズムをどのように解明するかは、本課題における最も重要な作業となる。まず、当然ながら植物バイオマス炭素が増加し続ける成長途中の生態系は炭素シンクとなる。しかし、植物バイオマスはあるときから増加しなくなることは多くの研究によって実証されている（Larcher 2001）。したがって、その後もシンク機能を維持し続けるとすれば、土壌の炭素シーケストレーション機能が飽和しないためと考えられる。土壌の炭素シーケストレーションは植物遺体を中心とする有機物の供給と分解による炭素放出の差し引きできまる。植生遷移が起これば、植物遺体の量と質も変化する。このうち、質の変化とは有機物の分解の難易を意味する。したがって、土壌に供給される植物遺体の量と質の変化が土壌炭素収支および土壌炭素シーケストレーションを規定することになる。以上より、本課題では土壌に供給される炭素の量と質に着目して炭素循環の遷移研究を行い、生態系が長期的な炭素シンクに成りうることを検証する。

3. 研究の方法

本研究課題は、様々な二次遷移段階の生態系における調査と遷移モデルを構築することにより、生態系は土壌という強力な炭素リザーバーがあることで長期的に炭

素を蓄積できる能力を持つという仮説を検証し、生態系炭素シンク機能における長期持続性の有無に解答を与えようとするものである。この目的のために、生態系の遷移過程に注目し、遷移とともに炭素循環プロセスがどのように変化していくのかをクロノシーケンス的な研究アプローチおよび遷移実験で明らかにした。二次遷移を対象とした調査を行うサイトは筑波大学菅平高原実験センター内およびその周辺の生態系である。また、新たに一次遷移の調査地（三宅島）を設定し、一次遷移に伴う土壌炭素貯留の持続性について検討した。

本研究課題は、以下の5つの研究項目からなる。

- 裸地～草原期における炭素循環プロセス変化の解明
- 草原最終期～森林期における炭素循環プロセス変化の解明
- 全遷移過程（裸地→草原→森林）における土壌炭素プロセスの解明
- 生態系炭素循環機能の二次遷移プロセスモデルの構築
- 一次遷移に伴う土壌炭素の持続的貯留

以上の研究を遂行するために、生態系生態学、植物生態学、土壌学、生態系モデリングを専門とする研究者からなる研究体制を構築し、平成19年から平成22年までの4年間に渡って研究を行った。以下に、具体的な研究方法について、項目別に記述する。

(1) 二次遷移に伴う炭素循環の変化

長野県菅平および岐阜県高山市を中心とした調査地において、二次遷移系列上にある生態系を選定し、炭素循環に係わる諸量（バイオマス、土壌炭素量、CO₂フラックスなど）を測定した。調査期間は平成19年～平成22年までだった。具体的な測定項目と測定方法は次の通りである。

測定項目	測定手法
バイオマス	生産・被食サブプロット内に1 m×1 mの枠を設置し、その中の地上部と地下部をサンプリングして求める。一回のサンプリングに5枠の刈り取りを行う。
枯死量	バイオマス調査枠内の地面にリタートラップを設置し、定期的に地上部枯死体を回収する。地下部枯死体は地下部バイオマスのサンプリングのとき、目視による枯死部分を回収する。

被食量	地上部の被食量はリタートラップにより回収された動物糞の量を測定する。別途、植食量と排泄物量の比（同化率）を求めておき、この比と糞量とから地上部被食量を求める。地下部の被食量の推定は行わなかった。
生産量	バイオマス、枯死量、被食量から積み上げ法によって求める。また、一部の生態系ではあるいは、ミニライゾトロン法を用いて測定を行った。
リター量（0層有機物量）	バイオマス測定枠内の土壌表面に堆積した有機物を回収して求める。
土壌炭素量（A、B層有機物量）	エンジン式土壌コア採取機を用いて、地下1 mまでの土壌を採取し、土壌炭素量を求める。
リター分解量	リター分解量はリターバッグ法により推定する。
土壌有機物分解量	生育期間中は自動開閉式チャンバー法により各プロット8点で測定する。冬期は濃度勾配法を用いて測定する。
土壌へ供給される有機物構成成分の定量的解析	リターや枯死植物根をサンプリングし、それらを構成する有機成分を化学的に定量し、それらの時間変化または生態系ごとの差異を明らかにする。
物理化学的環境要因の測定	温度、水分、光など、生物炭素循環諸量を規定する環境要因について連続的に測定する。

(2) 二次遷移—炭素循環モデルの構築

植生の遷移過程に伴う生態系内の物質循環の変化を記述するために、次の2つの素粗過程を取り込んだモデルを構築した。

- ① 植物種の新規加入、種内・種間競合、交代過程
 植生の遷移・動態を記述するためには、林冠ギャップといった時間的空間的不均一な植物群集内の様相を取り入れる必要があった。そこで、各植物個体の空間配置とサイズによって決まる群集の空間構造に即した光環境の時間的空間的不均一性を考慮する、個体ベースの植生動態モデルを作成した。
- ② 群集構造に即した大気・植生・土壌間の物質ストック・フロー

大気を介した物質のフローは群集の内部構造を考慮した鉛直1次元多層微気象モデルによって熱・水収支とともにCO₂のフローは計算された。植物への炭素・窒素のストックと収支は個体ベースで計算された。土壌での物質収支は空間平均で計算される。土壌内は垂直方向に多層に分割して、各層で分解率の違いに基づくコンパートメントモデルによって有機炭素の動態が記述された。植生の遷移は、実生の生存などがある場の偶然に左右されることを考慮するために、ある植物群集に対して、おなじサイズ構造の個体の空間配置をランダムに変化させたアンサンブルを多数計算して、次時間の群集構造をそれらの確率平均とした。

以上のようにしてモデルを約3年間(平成19年~21年)かけて構築したが、平成20年度には土壌炭素動態を中心として二次遷移の影響を記述できるモデルを完成させた。植生の遷移シナリオを作成し、そのアウトプットをこのモデルに与え、そのシミュレーション能力を検討した。最終年度に最終的なモデルを使って二次遷移に伴う炭素循環諸量の変化をシミュレーションした。また、スギ植林地における炭素動態もシミュレーションした。これは、京都メカニズムの対象が植林地であることを意識したものであった。

(3) 一次遷移に伴う土壌炭素の持続的貯留

三宅島および大島において泥流が流れ、その後の植生回復速度の異なる3か所を対象として、土壌を中心とした炭素循環諸量を調査した。調査内容は二次遷移の場合と同様であった。夏のみ調査を平成20・21年に行い、本格的な調査は最終年度に行った。

4. 研究成果

(1) 二次遷移に伴う炭素循環の変化

長野県菅平および岐阜県高山の調査地において、二次遷移系列は、裸地、ヨモギ、ススキ、アカマツ、ミズナラ、ブナであった。二次遷移に伴ってバイオマスや土壌有機炭素は概ね増加傾向にあった。ただし、バイオマスは森林期に入るとは増加速度が小さくなった。一方、土壌炭素についても遷移の進行とともに増加していった。図1は、草本前期から木本初期に向けて土壌炭素が増加していることを示している。しかし、草原期から木本期へ移行する際に土壌炭素量が減少した。これは、これまでの常識を覆す知見であったので、以下に詳しく述べる。

生態系の構造や機能が最も著しく変化す

るのは草本期⇒木本期への移行期である。冷温帯では、ススキ草原からアカマツ林へと遷移することが明らかとなっている。筑波大学菅平高原実験センター内に維持されているススキ草原と40年前に刈り取りの放棄により遷移が進んだアカマツ林を対象として調査を行ったところ、菅平のススキ草原よりもアカマツ林における土壌炭素量の方が低い値となっていた(図1)。土壌有機物の分解速度を反映する土壌呼吸量について着目してみると、ススキ草原とアカマツ林に大きな差は見られなかった。このことから、草原から森林へ遷移する過程で土壌への有機物供給の減少が生じたものと考えられた。また、純一次生産量には際はなかったもので、注目すべきはリターフォール(落葉落枝)量であった。アカマツ林のリターフォール量はススキ草原よりも明らかに減少していた。地上部生産量に対するリターフォール量の割合はススキ草原で1、アカマツ林で約0.45であった。このことから、土壌炭素量の減少は②で指摘した土壌への炭素分配率が減少したことが大きな原因であるように思われた。今のところ、土壌への炭素分配率が減少した理由は、木本植物の生長様式にあるのではないかと考えている。木本植物では樹高生長を行うために純一次生産の一部を幹内に蓄える。その結果、リターフォールとして土壌へ供給される炭素は減少すると考えられる。現在菅平では、この可能性を検証する研究を進めているところである。この検証が進めば生態学的な視野に立った炭素循環研究に新たな一石を投じることになると期待される。

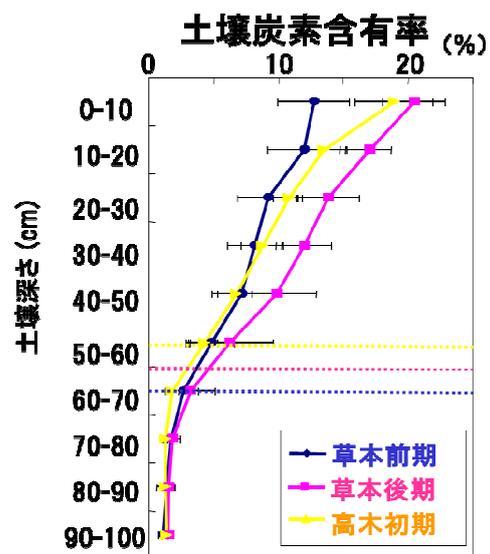


図1 二次遷移に伴う土壌炭素含有率の変化
(2) 二次遷移—炭素循環モデルの構築
二次遷移に伴う植生の変化を記述するモ

デルのうち、平成 20 年度に開発した土壌を中心とした炭素動態モデルを使ってシミュレーションした結果を紹介する。他の成果はまだ論文の途中であり、すべての成果の公表は差し控えたい。

表 1 は遷移／炭素動態モデルに必要なパラメータの一部である。ここでは植物根量を千系列ごとに示してあるが、これ以外にも多くのパラメータが使われた。それらのパラメータはすべて (1) の二次遷移に伴う炭素循環の変化を調査した結果から使われている。

表 1 二次遷移系列ごとの植物根量

根量	dw.(g)			
	live	died	全	全(g/㎡)
裸地	0.06	0.16	0.21	5.29
三モギ	8.48	1.00	9.48	237
ススキ	120.9	1.67	122.6	3065
ヤナギ	23.63	2.23	25.87	646.7
ノカマツ	25.47	0.90	26.37	659.2
ミズナラ	68.33	0.43	68.77	1719
ブ	281.5	0.53	282.1	7052

この時点でのモデルには二次遷移に伴う植生変化シナリオを別途与える必要がある。そのシナリオはこれまでに二次遷移をフィールドとした研究成果をもとに簡単なモデル計算で作られた。図 2 はその計算結果を示しており、ここではバイオマスとして種の交代がバイオマスの時間変化として一律に増加と減少を繰り返す内容となっている。この植生動態シナリオを土壌を中心として記述できるモデルに組み込み、土壌炭素動態を計算した結果を図 3 に紹介する。一部インプットデータが入力できていない問題点があるので、数字の入っていないコンパートメントも含まれている。

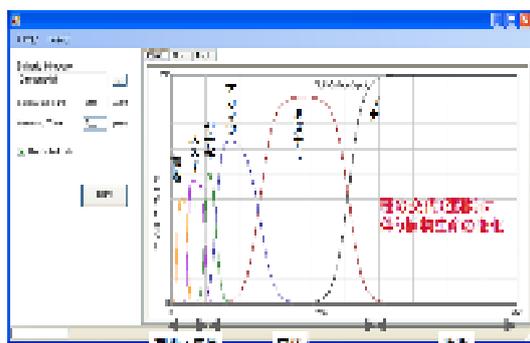


図 2 遷移／炭素動態モデルに組み込む植生変化シナリオ

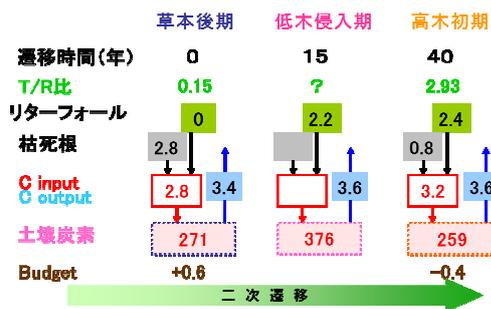


図 3 遷移／炭素動態モデルから得られた二次遷移に伴う土壌炭素動態の変化

以上のモデル解析から得られた結果より言えることは土壌炭素が草本後期から高木初期に減少することである。これは (1) 先述したことをモデルで裏付けた形になっている (原因については (1) を参照すること)。

最終年度には植林地の炭素シーケストレーション機能をシミュレーションしたが、その結果、炭素のシンクとして重要なのはバイオマスではなく土壌炭素プールであることが示された。

以上のようなモデルアウトプットを使うと、現在の様々な生態系が今後土地利用変化していったときに、どのような炭素循環および炭素収支の変化が生ずるのかを予測するのに役立つであろう。

(3) 一次遷移に伴う土壌炭素の持続的貯留

火山の多いわが国ではしばしば噴火によって植生が失われることがある。この場合、きわめて長い年月をかけて植生は回復していく。このような植生の回復過程を一次遷移という。本研究では一次遷移に伴う土壌有機炭素量の変化を研究し、一定の成果を得た。詳細な数字についてはまだ論文が進んでいないので差し控えたいが、概ね土壌有機炭素は植生の回復とともに急速に増加することが明らかとなっている。今後は、成果をより詳細に解析し、公表していきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

1. Yashiro Y, Lee N-Y, Ohtsuka T, Shizu Y, Saito TM, Koizumi H. (2010) Biometric based estimation of net ecosystem production (NEP) in a mature Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation beneath a flux tower. J Plant Res, in press. (査読有り)

2. Ohtsuka, T., Shizu, Y, Nishiwaki A, Yashiro Y, Koizumi H (2010) Carbon cycling and net ecosystem production at an early stage of secondary succession in an abandoned coppice forest. *Journal of Plant Research*, DOI 10.1007/s10265-009-0274-0. (査読有り)
3. Ohtsuka, T., Shizu, Y, Nishiwaki A, Yashiro Y, Koizumi H (2010) Carbon cycling and net ecosystem production at an early stage of secondary succession in an abandoned coppice forest. *Journal of Plant Research*, DOI 10.1007/s10265-009-0274-0. (査読有り)
4. Hirose D, Shirouzu T, Hirota M., Ohtsuka T., Senga Y, Du M, Shimono A, Zhang X (2009) Species richness and species composition of fungal communities associated with cellulose decomposition at different altitudes on the Tibetan Plateau. *Journal of Plant Ecology* 2009 2(4):217-224. (査読有り)
5. Oe, Y., Mariko S. (2007) Seasonal Variations in CH₄ Uptake and CO₂ Emission by a Japanese Temperate Deciduous Forest Soil. In: *Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and Adjacent Landmasses*, eds. Elsevier Oceanography Series, Volume 73, 2007, Pages 445-463. (査読有り)

[学会発表] (計 57 件)

1. 安木奈津美・吉竹晋平・小泉博「二次遷移初期林における現存量推定 ～相対成長式の改良と検証～」日本生態学会、平成 22 年 3 月 18 日、東京大学駒場キャンパス。
2. 井上智晴・小泉博「冷温帯放牧草原における土壌呼吸に対するリター呼吸量の寄与率とその変動」日本生態学会、平成 22 年 3 月 18 日、東京大学駒場キャンパス。
3. 川越みなみ・上條隆志・田村憲司「植生遷移と火山灰堆積地における土壌の初期生成」日本生態学会、平成 22 年 3 月 16 日、東京大学駒場キャンパス。
4. 南雲亮・鞠子茂「冷温帯アカマツ林・ミズナラ林におけるリター分解呼吸の測定とその制限要因の解明」日本生態学会、平成 21 年 3 月 19 日、岩手県立大学。
5. 小泉晋・鞠子茂「ササのないミズナラ林における土壌炭素動態」日本生態学会、平成 20 年 3 月 18 日、福岡国際会議場。

[図書] (計 3 件)

1. 鞠子茂・廣田 充・川田清和・浦野忠朗 (2007)「草原生態系の炭素循環」, 草原の科学への招待 (中村 徹編著), Pages 81-98

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鞠子 茂 (MARIKO SHIGERU)
法政大学・社会学部・教授
研究者番号：10251018

(2) 研究分担者

小泉 博 (KOIZUMI HIROSHI)
早稲田大学・教育総合科学学術院・教授
研究者番号：50303516
(H21→22)

横沢 正幸 (YOKOZAWA MASAYUKI)
独立行政法人農業環境技術研究所・大気環境解析領域・主任研究員
研究者番号：80354124

大塚 俊之 (OHTSUKA TOSHIYUKI)
岐阜大学・流域圏科学研究センター・教授
研究者番号：90272351

田村 憲司 (TAMURA KENJI)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・准教授
研究者番号：70211373

上條 隆志 (KAMIJO TAKASHI)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・准教授
研究者番号：10301079
(H21→22)

廣田 充 (HIROTA MITSURU)
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・准教授
研究者番号：90391151
(H19→20)